

青藏高原气候与冰冻圈变化研究进展

周秉荣¹, 袁佳双^{2*}, 乔斌^{1,3,4}, 马红璐^{1,3}, 史飞飞^{1,3,5}, 曹晓云^{1,3}, 颜玉倩^{1,3}, 孙玮婕^{1,3}

- 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810001
- 中国气象局国家气候中心, 北京 100081
- 青海省防灾减灾重点实验室, 青海 西宁 810001
- 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000
- 青海师范大学地理科学学院, 青海 西宁 810008

摘要: 青藏高原是全球气候变化最敏感、最具指示性的区域,也是中低纬度地区冰冻圈最发育的地区。近几十年来,全球气候变化对青藏高原冰冻圈产生了广泛而深刻的影响,成为气候系统多圈层相互作用研究的热点地区。本文利用气象台站观测资料分析了高原气候变化特征,梳理了高原冰冻圈关键要素(冰川、积雪、冻土)的时空变化研究进展。总体来看,1961—2021年青藏高原暖湿化特征明显,气温变化率为 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ($P<0.01$),降水量变化率为 $8.63\text{ mm}/(10\text{ a})$ ($P<0.01$),直接影响冰冻圈关键要素(冰川、积雪、冻土)的时空演化。青藏高原冰川整体呈退缩和亏损态势,东部和南部的冰川萎缩速率较大,平均积雪面积在2000年以后显著减少,积雪日数逐年递减,积雪深度在2000年之后出现显著下降且存在空间异质性。1980年以来青藏高原多年冻土、季节冻土面积呈显著减小趋势,其中季节冻土冻融周期缩短,冻结日期推后、解冻日期提前。目前,青藏高原气候要素观测依然不足,特别是针对冰川、冻土、积雪等冰冻圈要素的业务化观测明显不足。建议多部门协作、统一规范,构建以“水”和“防灾减灾”为主线的综合观测系统,强化气温、降水、冰川、冻土和积雪等关键气候变量的一体化监测、预测和服务能力,填补我国山地气候与气候变化业务的空白,为青藏高原水资源管理及经济社会可持续发展提供数据支撑。

关键词: 气候变化; 冰冻圈; 时空变化; 冰川; 积雪; 冻土

中图分类号: X171.1; P343.6 **文章编号:** 1001-6929(2024)09-1885-12

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.05.02

Research Progress on Climate and Cryosphere Changes in the Qinghai-Tibetan Plateau

ZHOU Bingrong¹, YUAN Jiashuang^{2*}, QIAO Bin^{1,3,4}, MA Honglu^{1,3}, SHI Feifei^{1,3,5}, CAO Xiaoyun^{1,3}, YAN Yuqian^{1,3}, SUN Weijie^{1,3}

- Qinghai Province Institute of Meteorological Sciences, Xining 810001, China
- National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
- Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Qinghai Province, Xining 810001, China
- College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
- School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

Abstract: The Qinghai-Tibetan Plateau is the most sensitive and indicative region of global climate change and is also the area of typical cryosphere development in the middle and low latitude regions. In recent decades, climate and cryosphere changes have become a hot topic in the study of multilayer interactions of climate systems, as global climate change has extensive and profound impacts on the cryosphere of the Qinghai-Tibetan Plateau. In this study, we analyzed the characteristics of climate change on the Qinghai-Tibetan Plateau using observation data from 94 meteorological stations on the plateau, summarized the research progress on the spatial and temporal

收稿日期: 2024-01-18 **修订日期:** 2024-04-10

作者简介: 周秉荣(1974-),男,青海湟中人,正高级工程师,硕士,主要从事高寒生态气象研究, zbr0515@foxmail.com

* **责任作者:** 袁佳双(1968-),女,山东青岛人,正高级工程师,博士,主要从事气候风险评估与政策研究, yuanjs@cma.gov.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.U21A2021);第二次青藏高原科考项目(No.2019QZKK0105)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U21A2021); Second Scientific Research Project on the Tibetan Plateau, China (No.2019QZKK0105)

evolution of key elements of the plateau cryosphere (glaciers, snow cover, permafrost). Overall, the climate of the Qinghai-Tibetan Plateau from 1961 to 2021 showed significant warming and humidifying characteristics, with an average annual temperature increase rate of $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ($P<0.01$) and an annual precipitation increase rate of $8.63\text{ mm}/(10\text{ a})$ ($P<0.01$). This directly affected the spatial and temporal evolution of the key elements of the cryosphere (glaciers, snow cover, and permafrost). The glaciers on the Qinghai-Tibetan Plateau generally showed retreat and loss, with greater rates of glacier shrinkage in the east and south. After 2000, the snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau decreased significantly, the number of snow days decreased year by year, and the snow depth decreased significantly with spatial heterogeneity. Since 1980, the area of perennial permafrost and seasonal permafrost on the plateau showed a significant decrease, the seasonal permafrost shortened the freeze-thaw cycle, the freezing date was postponed, and the thawing date was pushed forward. At present, there is still insufficient observation of climate elements on the Qinghai-Tibetan Plateau, especially the operational observation of cryosphere elements such as glaciers, permafrost and snow cover. It is recommended to coordinate and standardize multi-departments, establish a comprehensive observation network system for the cryosphere with 'water' and 'disaster prevention and reduction' as the principle lines, and strengthen the integration of monitoring, prediction, early warning and service of key meteorological variables such as temperature, precipitation, glacier, permafrost and snow cover. It will fill the gaps in China's mountain climate and climate change operation and provide data support for water resource management and sustainable economic and social development on the Qinghai-Tibetan Plateau.

Keywords: climate change; cryosphere; spatial-temporal variation; glacier; snow cover; permafrost

青藏高原是世界上海拔最高、地形最复杂的地区,其热力和动力作用对全球气候产生重大影响,是我国气候变化的“敏感区”“启动区”和全球变化的“驱动力”“放大器”^[1]。关于青藏高原气候变化的研究大多始于 20 世纪 60 年代,主要是基于气象台站观测数据和再分析资料分析气温、降水的时空变化特征,也有部分研究讨论青藏高原地面风速、日照时数等气象要素的变化情况,关于青藏高原气象要素变化与冰冻圈要素变化的综合论述不多。特别是,缺少系统梳理高原气象要素的研究,数据源及其时空范围不同,影响了研究结论的系统性和整体性,不能有效支撑青藏高原冰冻圈对气候变化响应与互馈机制的解释力。我国冰冻圈的主体为冰川、冻土和积雪^[2],青藏高原是我国冰冻圈发育的主要区域之一。作为冰冻圈的重要组成部分,冰川、冻土、积雪与大气圈有着不可分割的密切关系。在全球气候变暖背景下,青藏高原冰冻圈生态安全面临前所未有的挑战,深入了解青藏高原气候变化及关键冰冻圈要素(冰川、积雪、冻土)的时空演化对于保障国土资源生态安全、水资源安全、高原可持续发展以及预测全球气候变化都具有重要的指导意义。

青藏高原年均气温在 $-10\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,整体气温明显低于周边地区,在空间分布上呈现出从东部到西部逐渐降低的特点,东部大部地区年均气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,而西部地区年均气温在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下^[3-4]。这与青藏高原地形特征有密切关系,青藏高原北部的柴达木盆地地势较低,年均气温相对较高,而西部地区海拔较高,气温也相对较低。青藏高原降水量分布由西北

向东南逐渐增加,大部分地区年降水量在 800 mm 以下,主要的降水中心位于高原南部的雅鲁藏布江地区,年降水量为 $2\ 400\sim 2\ 800\text{ mm}$,降水极少区域位于柴达木盆地和唐古拉山西部的藏北高原,年降水量小于 400 mm ^[5]。

根据中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 2014 年发布的中国第二次冰川编目数据集,中国西部现有冰川总计 48 571 条,总面积 $51\ 766.08\text{ km}^2$,约占全国国土面积的 0.54%,其中青藏高原地区冰川储量为 $4.3\times 10^3\sim 4.7\times 10^3\text{ km}^3$ ^[5],是世界上中低纬地区最大的现代冰川分布区。青藏高原积雪主要集中于 9 月至翌年 5 月,积雪覆盖面积最大值多出现在 1 月前后,空间分布上具有明显的垂直地带性。总体上,海拔越高则积雪覆盖率越高,且北坡高于南坡,海拔 $2\ 000\text{ m}$ 以下积雪覆盖率不足 4%,海拔 $6\ 000\text{ m}$ 以上积雪覆盖率达 75%;在海拔 $4\ 000\text{ m}$ 以下的山地,海拔越高,年内单峰型变化特征越明显,而在海拔 $4\ 000\text{ m}$ 以上的山地,海拔越高,双峰型越明显^[6]。在全球变化的大背景下,积雪分布面积、深度、雪水当量、积雪日数等特征指标均发生了较大变化。青藏高原是我国最大的多年冻土分布区,也是全球中低纬度地区海拔最高、面积最大的多年冻土分布区^[7],多年冻土面积约为 $106\times 10^4\text{ km}^2$,占青藏高原总面积的 42.4%。与北极地区相比,青藏高原多年冻土地温高、厚度薄,对全球变暖更为敏感。青藏高原地区约 76.1% 的多年冻土温度高于 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中 22.9% 的多年冻土温度为 $-0.5\sim -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[8]。

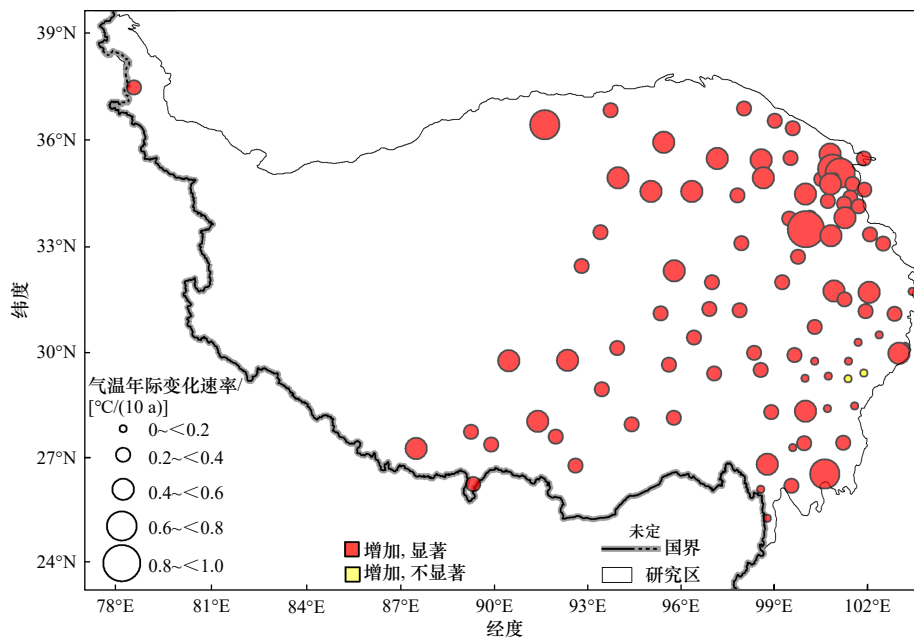
青藏高原作为冰川、积雪和冻土的重要发育地

区,已成为我国气候系统稳定、水资源补给和水安全、生物多样性保护、防灾减灾、基础设施保障、碳收支平衡等方面重要的安全屏障。目前,地处青藏高原的青海省已将全省 72.25% 的国土空间识别为生态空间^[9]。保护青藏高原的生态和环境不仅关系到我国,也关系到全球生态与人类生存环境和可持续发展。我国已组织开展了三次青藏高原大气科学实验,启动了第二次青藏高原综合科学考察,有力提高了人类对青藏高原及其相关科学领域的认知。随着全球变暖持续,青藏高原冰冻圈不稳定性风险加大,极端气候事件与冰冻圈灾害事件频发^[10]，“亚洲水塔”脆弱性凸显。为此,本文系统梳理了青藏高原气候与冰冻圈时空演化的研究成果,结合气象台站资料、卫星遥感数据试图阐明冰川、积雪、冻土等冰冻圈要素时空变化特征及其对气候变化的响应机制,以期为青藏高原气候变化的响应诊断分析提供参考,为筑牢青藏高原生态安全屏障和构建战略资源储备基地提供决策服务信息。

1 青藏高原气候变化特征

与全球变暖一致,青藏高原气温升高毋庸置疑,

但不同时段升温速率不同。1961—2021年,青藏高原年均气温显著升高,气温变化率约 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ($P<0.01$)(见图 1),超过全球同期气温变化率的 2 倍,尤其是 1980 年代以来的气温变化率不仅明显高于全球平均水平,而且高于全球其他高山区同期水平^[11]。近 60 年来,青藏高原气温升高过程具有显著的阶段性特征,1960 年代气温略升高,1970 年代相对稳定,1980 年代显著升高,1990 年代气温大幅升高并持续至今,2010 年代为有观测记录以来最暖的 10 年(见图 1)。最低气温上升速率高于最高气温上升速率,夜间增温速率大于白天增温速率,且冬季增温速率最显著^[12-13]。青藏高原增温速率与海拔密切相关,变暖速率在海拔 4 000 m 左右最大,5 000 m 以上山地由于积雪覆盖时间长,积雪-反照率正反馈造成的增温效应有所降低,导致 5 000 m 以上和以下山地增温型相反^[14]。青藏高原北部地区升温速率较东南部地区更显著,其中羌塘高原和柴达木盆地气温变化率超过 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ (见图 1)。极端高温事件频次明显增加,2000 年以来尤为突出,2011—2020 年极端高温事件频次较 1981—2010 年平均值高出 81%。



注:审图号 GS 京(2024)1506 号。下同。

图 1 1961—2021 年青藏高原年均气温变化速率

Fig.1 Rate of change in mean annual temperature on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1961 to 2021

自 1960 年以来,不同阶段青藏高原降水量的变化速率不同,但降水量整体呈现增加趋势。1961—2021 年,青藏高原年降水量显著增加 ($P<0.01$),平均每 10 年增加约 8.6 mm(见图 2),且主要增加在雨季^[15-17]。

其中,位于青藏高原腹地的三江源地区 1957—2012 年平均降水量为 467 mm^[18],2016 年以来降水量异常偏多,2016—2020 年平均降水量达 539.6 mm。空间分布上,降水显著增加的 37 个气象站集中在青藏高

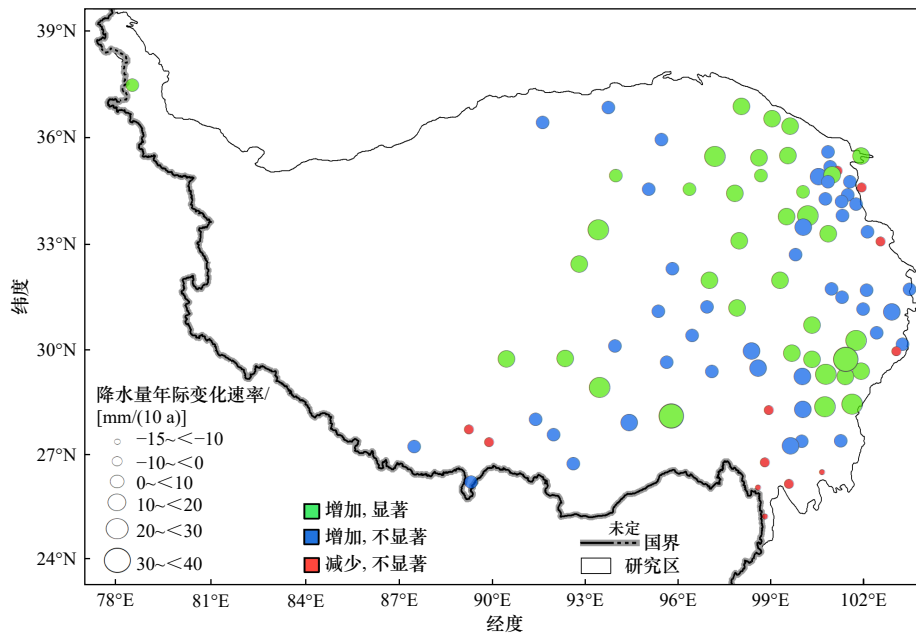


图 2 1961—2021 年青藏高原年降水量变化趋势

Fig.2 Trends in annual precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau during 1961 to 2021

原东部和中部部分地区, 增加速率介于 2.16~33.61 mm/(10 a) 之间, 其中三江源地区降水增加速率最大, 为 5~20 mm/(10 a); 而高原东部和南部边缘地区 12 个气象站降水量呈现减少趋势, 但不显著。此外, 降水极端性增强, 2011—2020 年极端降水事件比 1981—2010 年平均值增加了 75%, 2020 年暴雪等级以上的累计降雪量为 1961 年以来最多。

2 青藏高原冰冻圈变化特征

2.1 冰川变化特征

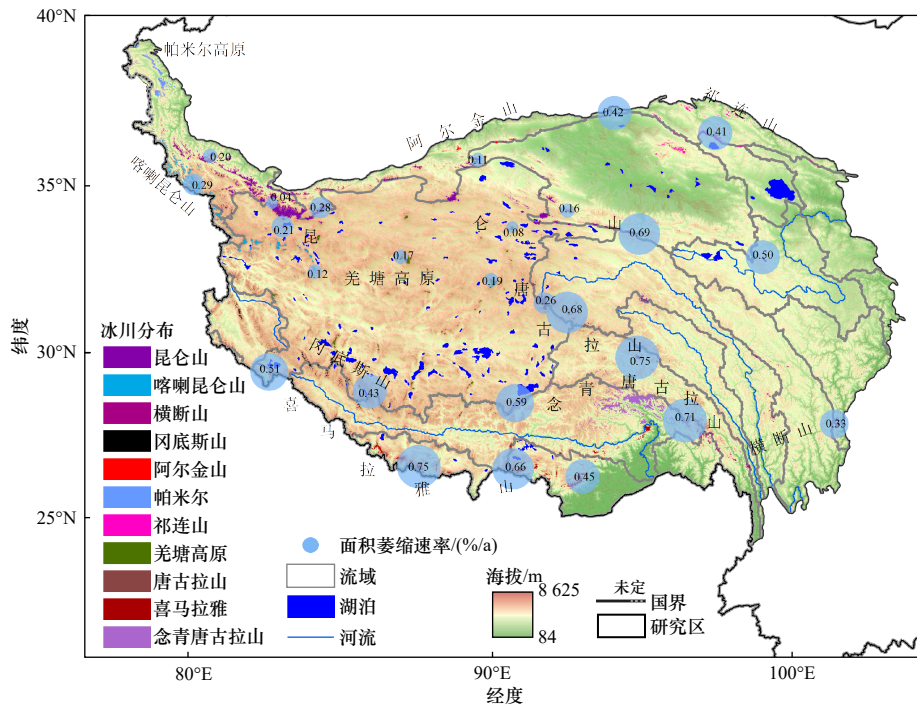
随着全球变暖, 以青藏高原为核心的亚洲高山区冰川持续萎缩, 但区域差异显著, 总体上四周萎缩速率高于中心区 (见图 3)。1970 年代以来, 青藏高原南部地区冰川萎缩率不断加速^[20-21], 喜马拉雅山中段和冈底斯山地区以及西部印度河部分流域地区的冰川面积萎缩率为整个中国西部最大, 而羌塘高原、西昆仑山、喀喇昆仑山和帕米尔高原的冰川萎缩速率较小^[22-24]。

青藏高原冰川物质平衡变化与冰川面积变化的空间格局具有很好的一致性 (见图 4)。青藏高原东部和南部地区冰川物质不仅亏损量大, 而且基本处于加速亏损状态, 其中藏东南地区尤为显著, 2000 年以来冰川物质亏损速率大于 0.6 m w.e./a (见图 4)。1970 年以来, 喀喇昆仑山、西昆仑山和帕米尔高原地区冰川物质损失非常低, 甚至出现轻微正平衡状态^[25-26], 即“喀喇昆仑异常”现象。

2.2 积雪变化特征

自 20 世纪中期以来全球几乎所有山地积雪都在减少^[27]。1970 年代以来, 青藏高原积雪期积雪范围总体呈减少趋势^[28], 其中八九十年代积雪覆盖范围较大, 2000 年以后显著减少^[29-30], 1997—2011 年积雪覆盖范围占青藏高原总范围的比值以 4%/(10 a) 的速率显著降低。青藏高原积雪范围变化空间差异较大, 1978—2010 年表现为藏东南减少、藏西北增加, 低海拔总体增加、高海拔变化不大的特征; 低海拔地区冬季积雪范围略有增加, 春秋减少, 而高海拔地区秋冬略有增加、春季减少^[24]。2000—2014 年高原年均积雪范围季节性差异很大, 秋季略增加, 其他季节略减少, 其中夏季减少趋势相对较明显。

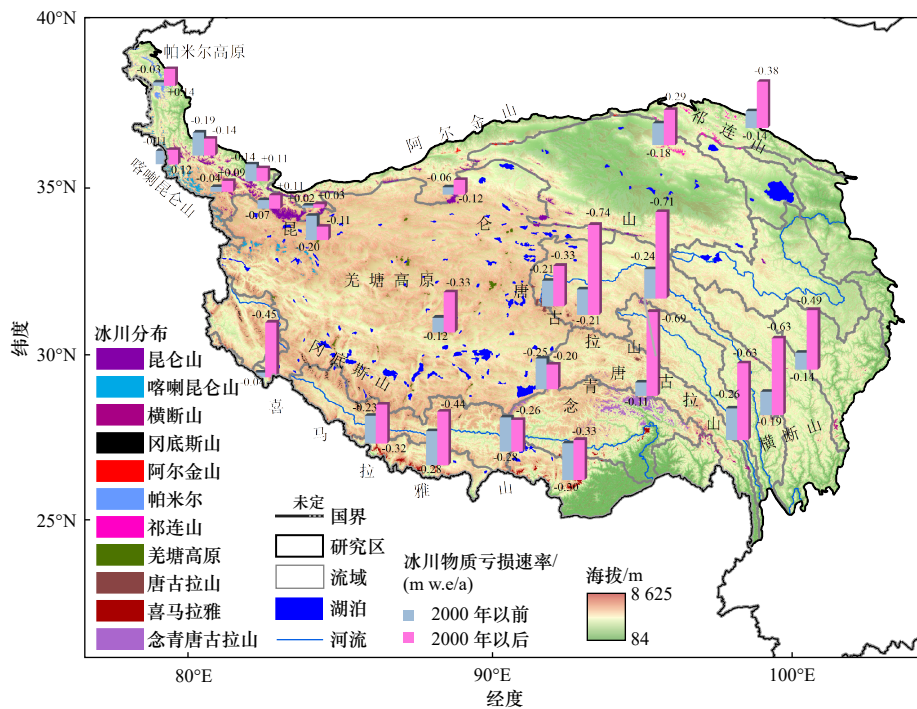
1961—2014 年, 青藏高原积雪日数呈不显著下降趋势, 约为 -0.64 d/(10 a), 但具有明显的年代际变化特征, 以 1990 年代为转折期呈现先增后减的趋势特征, 1990 年代末期以来显著偏少^[29,31], 但近 20 年减少趋势放缓, 甚至呈现有略微增加趋势。积雪日数的这种变化可能与 20 世纪 80 年代中期以来青藏高原气候显著变暖有关^[32]。同时青藏高原积雪日数空间分布异质性较强, 1980—2016 年大部分区域积雪日数呈减少的趋势, 年际变化速率小于 -2 d/a 的区域约占整个高原总面积的一半^[30], 而 2001—2020 年积雪日数减少区域大部分是稳定积雪区, 如念青唐古拉山、喀喇昆仑山等高海拔山脉地区, 而不稳定积雪区积雪日数大都呈增加趋势, 主要分布在青南高原、藏北高原和祁连山局部地区。此外, 青藏高原多年平均积雪



注: 修改自文献 [19]。

图 3 1970 年代以来青藏高原不同区域冰川面积萎缩速率

Fig.3 Rate of glacier area shrinkage in different regions of the Qinghai-Tibetan Plateau Since the 1970s



注: 修改自文献 [19]。

图 4 1970 年代以来不同时段青藏高原冰川物质平衡变化

Fig.4 Changes in glacier mass balance in the Qinghai-Tibetan Plateau at different time periods since the 1970s

日数与海拔关系密切,在海拔低于 5 000 m 的山地,海拔每增加 1 000 m,积雪日数将增加 1.58 d;在海拔为 5 000~6 500 m 的山地,积雪日数以 21.15 d/(1 000 m) 的速率随海拔的升高而迅速增大,平均每升高 1 000 m,积雪日数将增加 21.15 d;在海拔大于 6 500 m 的山地,积雪日数随海拔变化不明显(见图 5)。

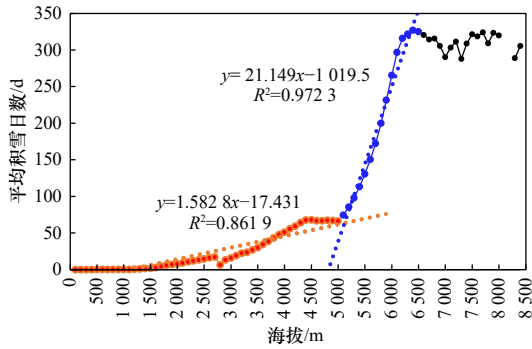


图 5 2001—2020 年青藏高原积雪日数与海拔的关系

Fig.5 Relationship between the number of snow cover days and altitude on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2001 to 2020

青藏高原积雪深度和雪水当量有着相似的变化特征,且与积雪面积变化特征相似。1961—2014 年,年均积雪深度呈下降趋势^[28],但不显著,约为-0.008 cm/(10 a)^[31]。其中 1960—1990 年,雪水当量增加了 1.5 mm,1990—2004 年减少了 1.2 mm^[33];自 1990 年代后期,青藏高原积雪深度明显偏浅,积雪量偏少且波动

较小^[29,33-35],2000 年代较 1990 年代平均减少 0.09 cm,约占 1961—2014 年平均值的 35%^[31]。从季节尺度看,青藏高原冬季平均积雪深度与年均积雪深度有着类似的年代际变化特征。与积雪日数类似,高原积雪深度变化亦具有明显的时空异质性。进入 21 世纪以来,青藏高原腹地年均积雪深度显著减少,但中东部部分地区显著增加(见图 6),这种特征在冬春季尤为突出;与积雪日数变化相比,秋季三江源地区积雪深度显著增加的特征不如积雪日数突出。此外,青藏高原积雪深度随海拔的变化特征表现为平均每升高 1 000 m,积雪深度将增加约 0.05 cm(见图 7)。

2.3 冻土变化特征

随着全球变暖,青藏高原冻土发生不同程度的退化,表现为多年冻土区面积减小、年均地温 (MAGT) 和活动层底部温度均明显升高、多年冻土活动层明显增厚,季节冻土区也出现冻结时间缩短、冻结深度减小的现象^[36-37]。

2.3.1 多年冻土

青藏高原多年冻土变化主要依靠冻土钻孔温度监测、地面调查(钻探、地质雷达等)方法确定。1980 年代以来,青藏高原多年冻土面积从 $139 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少到 2010 年代的 $126 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均变化率约为 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2 / (10 \text{ a})$ 。1980—2018 年,青藏高原多年冻土区年平均地温 (MAGT) 升高速率为 $0.02 \sim 0.26 \text{ }^\circ\text{C} / (10 \text{ a})$,6 m 和 10 m 深度处多年冻土温度分别上升了约 0.13 和 0.14 $^\circ\text{C}$,其中 1996—2006 年 67% 的钻孔点多年冻

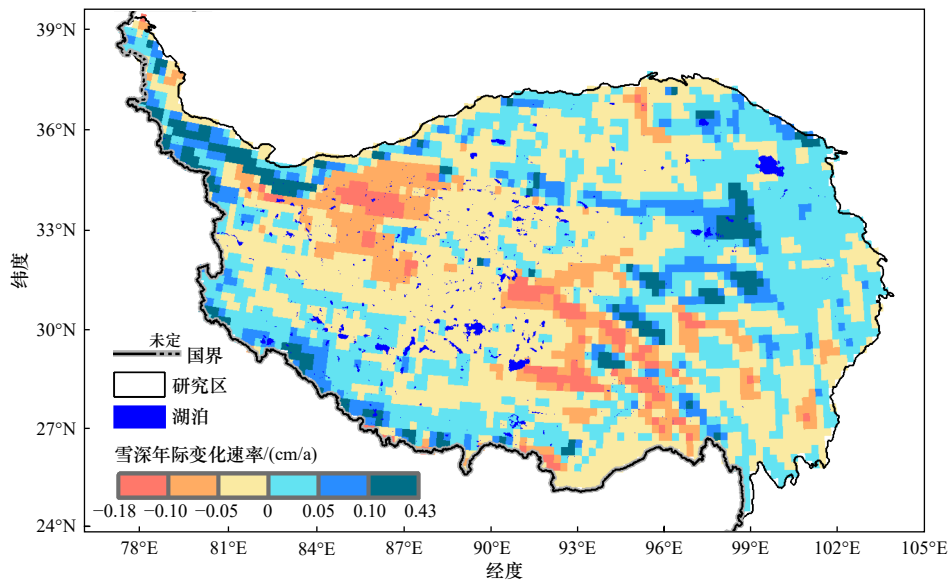


图 6 2000—2020 年青藏高原积雪深度年际变化速率空间分布

Fig.6 Spatial distribution of interannual variation rate of snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2000 to 2020

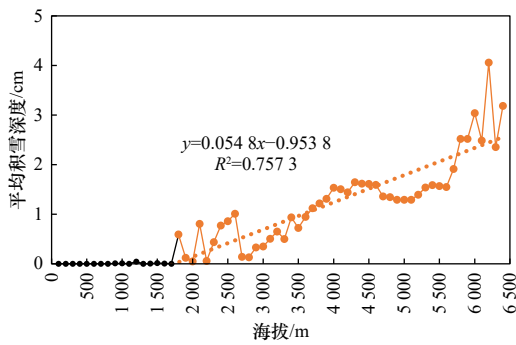


图7 2000—2020年青藏高原积雪深度与海拔的关系

Fig.7 Relationship between snow depth and altitude on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2000 to 2020

土温度显著上升, 6 m 深度处多年冻土升温速率约为 $(0.18 \pm 0.12)^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$, 15 m 深度处升温速率约为 $(0.17 \pm 0.11)^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$ ^[21]。2004—2018 年, 多年冻土活动层底部温度呈明显上升趋势, 约为 $0.49^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$ ^[38]; 低温多年冻土 (MAGT < -1.0°C) 升温速率高于高温多年冻土 (MAGT > -1.0°C)^[38]。青藏高原多年冻土活动层厚度不断增加, 2000 年代以来增速加剧。1980—2018 年, 青藏高原多年冻土活动层增厚速率约为 $19.5 \text{ cm}/(10 \text{ a})$, 其中 2002—2012 年中部活动层增厚速率约为 $42.6 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ (见图 8)。1981—2018 年, 青藏公路沿线多年冻土活动层平均增厚速率为 $1.95 \text{ cm}/\text{a}$, 其中 2010 年前平均增厚速率约为 $1.72 \text{ cm}/\text{a}$, 2010—2018 年平均增幅达 $2.43 \text{ cm}/\text{a}$ ^[38]。同时也需注意到, 不同的冻土热稳定性类型活动层厚度和多年冻土温度变化具有显著性差异(见表 1)。

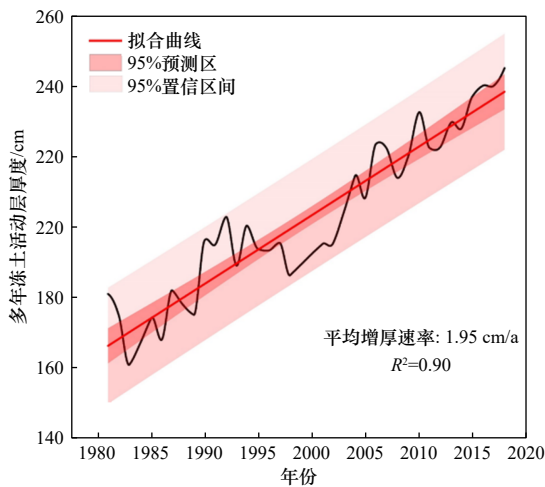


图8 青藏高原多年冻土活动层厚度变化^[28,30]

Fig.8 Thickness change of the permafrost active layer on the Qinghai-Tibetan Plateau^[28,30]

表1 青藏公路沿线多年冻土活动层厚度和多年冻土温度变化
Table 1 Thickness of the permafrost active layer and temperature change of permafrost along the Qinghai-Tibet Highway

多年冻土类型	活动层厚度增加速率/[cm/(10 a)]	升温速率/[$^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$]		数据来源
		6 m 深冻土温度	15 m 深冻土温度	
稳定型	50.93	0.49	—	文献[16,36,39-40]
亚稳定型	32.7	0.32	0.32	
过渡型	33.61	0.13	0.15	
不稳定型	58.19	0.16	0.14	

注: —表示缺少资料。

2.3.2 季节冻土

在全球气候变暖的背景下, 青藏高原季节冻土最大冻结深度基本呈逐年减薄的特征^[41-44]。与中高纬度地区相比, 青藏高原季节冻土最大冻结深度的下降速率更大, 其中祁连山地区的下降趋势最为明显。1960—2014 年, 青藏高原季节冻土最大冻结深度平均变化速率约为 $-4.9 \text{ cm}/(10 \text{ a})$, 55 年净减薄 26.8 cm, 其中 2/3 的站点最大冻结深度显著下降^[45]; 祁连山季节冻土最大冻结深度的下降速率约为 $-7.4 \text{ cm}/(10 \text{ a})$, 55 年净减薄 40.2 cm^[46]。1981—2020 年, 青藏高原季节冻土减薄速率约为 $5.1 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ (见图 9), 出现减薄的台站增多, 约占总台站数的 83%(见图 10)。其中, 1981—2020 年三江源地区平均最大冻结深度为 136.66 cm, 季节冻土明显减薄, 最大冻结深度递减率为 $5.1 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ ^[47]。值得注意的是, 观测结果^[41,44]和模拟结果^[48]也表明青藏高原个别站点季节冻土增厚。需要说明的是, 三江源地区季节冻土最大冻结深度增加可能与迁站有关, 在最大冻结深度增加的 14 个季节冻土监测站中, 有 13 个监测站有过迁站史, 其中约有 85% 的监测站迁站到海拔更高的地区。

此外, 青藏高原季节冻土冻结持续时间呈下降趋势, 1960—2014 年下降速率约为 $6.0 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 。55 年净缩短 33 d, 其中冻结开始日期略有推迟, 平均速率为 $1.83 \text{ d}/(10 \text{ a})$; 55 年净推迟 10 d, 冻结结束日显著提前, 平均速率为 $4.1 \text{ d}/(10 \text{ a})$; 55 年净提前 22.55 d^[45,49]。近 40 年, 青藏高原季节冻土冻结持续时间进一步缩短, 缩短速率约为 $8.6 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 主要表现为冻结初日进一步推迟, 其中冻结初日推迟速率约为 $4.0 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 冻结终日提前速率约为 $4.6 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 。

就季节冻土面积而言, 由于计算方法和计算年限的长短不同, 不同学者计算的季节冻土面积结果有所差异。整体来看, 青藏高原季节冻土面积在 $0.87 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 之间, 相差 2 倍左右, 除方法上的差异外, 不同学者对多年冻土与季节冻土并存区域的归类也

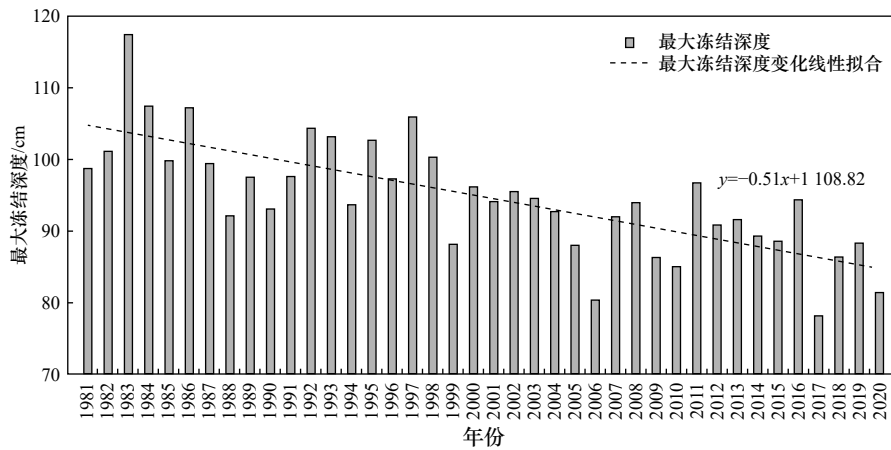


图 9 1981—2020 年青藏高原季节冻土最大冻结深度变化

Fig.9 Changes in the maximum freezing depth of seasonal permafrost on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1981 to 2020

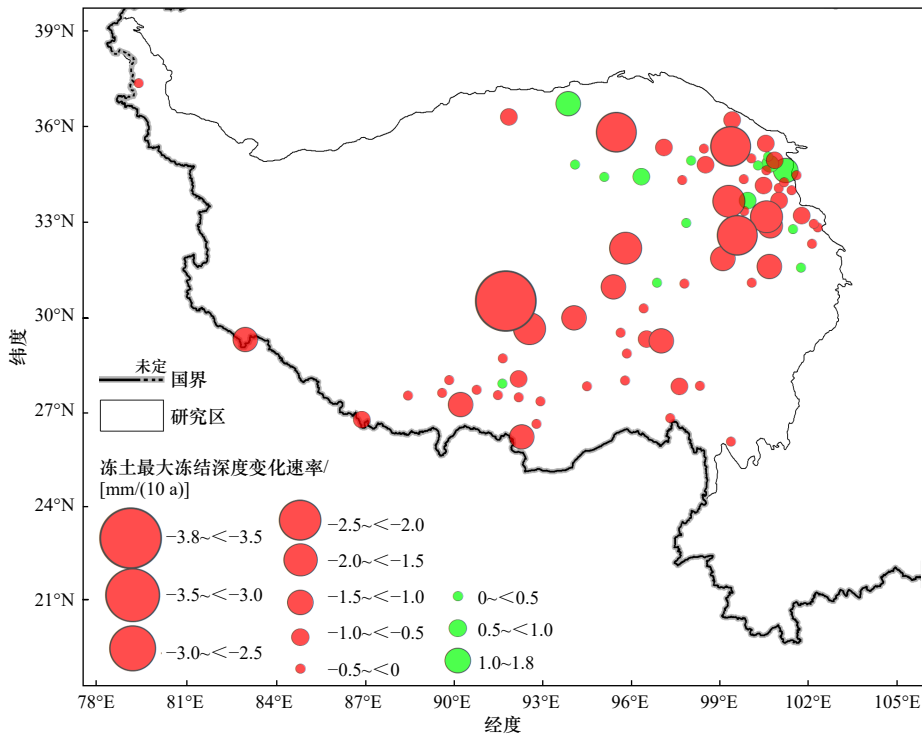


图 10 1981—2020 年青藏高原季节冻土最大冻结深度变率空间分布

Fig.10 Spatial distribution of maximum freezing depth variation rate of seasonal permafrost on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1981 to 2020

是导致最终结果不同的主要原因^[40]。此外,季节冻土观测站点少、数据时间序列短,在局部、区域和半球尺度上,土壤温度、土壤水分、冻融深度、冻结持续时间等冻土监测特征指标与气候变量单因子及多因子交互相互作用的研究仍然相对较少,缺乏长期观测评估是研究季节性冻土变化的主要障碍^[50]。

3 冰冻圈要素变化的气候驱动机制

3.1 冰川变化的气候驱动机制

近半个世纪以来青藏高原冰川变化区域特征差异明显,气温和降水的变化是驱动冰川变化的主要原因,夏季气温和年降雪量的变化更直接影响山地冰川的进退,二者共同决定冰川物质支出和收入,从而决定冰川的物质平衡状况^[24]。值得注意的是,人类影响导致气候变暖可能是 20 世纪 90 代以来冰川融化的主要驱动因素^[51]。总体而言,青藏高原地区降水量增加带来的冰川积累量的增加不足以抵消因温度升高

而增加的消融量,升温仍是造成青藏高原大部分地区冰川物质亏损加速的直接原因^[2,52-53]。

青藏高原不同子区域冰川变化的主要驱动因素各不相同。青藏高原东南边缘由于年均正积温高、负积温低、液态降水占比大且近年来降雪量占总降水量的比例大幅下降,冰川面积相对萎缩速率大、冰川消失和分裂冰川占比高,而且由于冰川数量多且平均规模较大,该区域冰川物质绝对损失量最大;相反,青藏高原腹地和西北部冰川面积相对萎缩速率和物质绝对损失量均偏低,消失冰川和分裂冰川数量少,前进冰川数量众多,可主要归因于该地区年均正积温低、负积温高,冰川区主要以降雪为主且近几十年来降雪趋势增加^[2,54]。Su等^[55]总结冰川加速退缩的主要影响因子包括:①消融期气温增加;②冰川区特别是海洋性冰川区液态降水增加;③消融区扩张和污染物沉降等引起冰川表面反照率的降低;④冰温增加(特别是大陆型冰川);⑤冰川表面破碎化(特别是海洋型冰川)。此外,冰川规模、表碛覆盖率、平均海拔、坡度和坡向等冰川形态和地形因素在局地 and 流域尺度对冰川变化产生深远影响^[55]。

3.2 积雪变化的气候驱动机制

降雪是积雪的主要物质来源,其消融除了受辐射影响而升华外,对温度尤其敏感。一般认为,积雪面积与平均气温、平均最高气温和平均最低气温之间均呈负相关,即气温升高会引起积雪面积的减少。其中,青藏高原积雪面积变化对最高气温更为敏感,线性相关程度最高,其主要原因是雪季高原气温较低,最低气温出现在夜晚,对积雪消融的贡献小,而最高气温出现在白天,太阳辐射强烈,升温迅速,对积雪消融所起的作用更为明显^[56]。在青藏高原冬春多雪年,中国北方大部分地区夏季气温比常年低,而南方地区夏季气温比常年偏高,少雪年则相反。多雪年副热带高压带位置在长江中下游至华南一带,向西延伸范围大,因而这一地区夏季气温偏高^[57-58],西南地区积雪深度积雪日数均与气温呈较强负相关^[59]。从年代际尺度看,1990年代末青藏高原积雪的突变与气温和降水过程变化有关^[12],其中1961—1998年冬春季积雪深度增加与降水增加有关,而1998—2014年气温的上升以及降水的减少共同导致了积雪深度的减少^[60],1998—2003年连续6年降水偏少,导致积雪深度偏浅^[61]。此外,由于青藏高原升温具有海拔依赖性,高原中部升温受海拔影响更显著,使得积雪减少得更多^[12],但积雪本身的变化趋势是否具有海拔依赖性尚存较大争议。

3.3 冻土变化的气候驱动机制

冻土空间分布主要受到气候条件的影响。青藏高原季节性冻土和多年冻土的活动层有着独特的季节性变化特征,季节冻土对不同时间尺度的气温变化具有内在敏感性。青藏高原多年冻土有地温高、厚度薄的特点,温度升高会很容易导致其从冻结状态转变成融化状态,山地多年冻土温度还受地形、地表类型、土壤质地和积雪覆盖等局地条件影响。

对季节冻土最大冻结深度的潜在气候和环境驱动因子的研究发现,年均气温、地表温度、解冻指数、地表融化指数均与季节冻土的最大冻土深度呈负相关^[62],其中气温是主要影响因子,在祁连山地区,季节冻土最大冻结深度与温度的相关系数高达-0.92,且海拔较高地区的冻土最大冻结深度下降较快^[46]。虽然降水在冻土最大冻结深度变化中也扮演着重要角色,但由于季节冻土变化机制的复杂性,其影响的物理机制尚需深入研究^[63]。有学者认为,青藏高原虽然冬季的气温几乎为零,但当降水产生时仍能对南部和柴达木盆地干旱地区的冻土最大冻结深度变化表现出显著的控制作用。在干旱地区,相对干燥的土壤一般有更大的潜力保持渗透水,因此,异常大的液态物质可能会在土壤中储存足够长的时间,以便在下一个冻结季节对冻土最大冻结深度产生影响^[64]。也有学者认为,土壤含水量引起的相变效应在相对干旱地区可能较弱,但在较潮湿的环境中则可能占主导地位。

4 结论与展望

a) 1980年以来青藏高原冰川普遍萎缩,冰川物质平衡变化与冰川面积变化在空间格局上具有较好的一致性,其中在东部和南部地区的冰川物质均处于加速亏损状态,尤以东南地区最为显著,而在西北部的喀喇昆仑山、西昆仑山和帕米尔高原地区的冰川物质平衡水平普遍偏低。合成孔径雷达(SAR)、激光测高和立体测绘等新型卫星技术的发展为实现冰川面积、体积和冰川表面流速的监测带来了新的发展机遇。鉴于此,后期应合理规划气象水文监测站点布局,建立满足冰川学研究的综合性地面观测站网,积极构建基于遥感资料的气候-冰川-水文过程耦合模型,以准确评估气候变化环境下冰川水资源状况及其影响,服务于青藏高原社会经济发展和生态文明建设。

b) 青藏高原积雪在空间上主要表现为“四周多、中间少”的特征,平均积雪面积在20世纪八九十年代较大,2000年以后显著减少;1980—2016年大部分区域积雪日数呈逐年递减趋势,积雪深度在2000年

之前波动较大,在2000年之后出现显著下降且存在空间异质性。青藏高原积雪通过改变热力作用而影响东亚季风进程、大气环流以及我国的气温和降水,其中冬春季积雪深度与东亚夏季风呈负相关。准确掌握青藏高原积雪时空分布对提升全球和区域气象预报与气候预测、水文模拟与预报、水资源管理等具有重要科学意义。目前,在对青藏高原地区积雪变化的监测手段、研究方法和成果凝练等方面虽然取得了较大进步,但仍然存在问题尚待解决。积雪变化过程对植被生态系统组成、结构、功能、生物地球化学循环以及冻土和水文过程的影响与反馈机制等方面还需从机理出发开展深入研究。

c) 青藏高原多年冻土面积从1980年代以来的 $139 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少到2010年代的 $126 \times 10^4 \text{ km}^2$,1980—2018年多年冻土活动层增厚速率约为 $19.5 \text{ cm}/(10 \text{ a})$ 。1980—2021年青藏高原季节冻土最大冻结深度呈显著减小的趋势,季节冻土平均冻融周期(冻结持续时间)为177 d,40年间冻结持续时间呈逐渐缩短趋势,缩短速率为 $8.6 \text{ d}/(10 \text{ a})$,季节冻土冻结初日推后[推后速率为 $4.0 \text{ d}/(10 \text{ a})$]、冻结中日提前[提前速率为 $4.6 \text{ d}/(10 \text{ a})$]。总之,冻土变化是土壤温度、土壤水分变化的综合反映。因此,建议未来加强冻土规范化监测和组网观测,强化季节冻土与植被、水文、碳循环之间物理机制的研究,适时开展整体性、系统化的高原冻土冻融过程气候效应、生态效应及机理研究。

d) 在过去10年中,世界气象组织(WMO)一直推动建立全球冰冻圈监视网(GCW),为获取青藏高原气候与冰冻圈生态气象本底信息和满足服务需求,由我国牵头的WMO第三极区域气候中心网络(TPRCC-Network)正在加快建设。在国家第二次青藏高原综合科考和第三次青藏高原大气科学实验计划实施中也发现,青藏高原气候要素在时间和空间上的观测依然不足,特别是针对冰川、冻土、积雪等冰冻圈要素的业务化观测明显不足。建议多部门协作、统一规范,构建以“水”和“防灾减灾”为主线的综合观测系统,强化气温、降水、冰川、冻土和积雪等关键气候变量的一体化监测、预测和服务能力,填补我国山地气候与气候变化业务的空白,为青藏高原水资源管理及经济社会可持续发展提供数据支撑。

参考文献(References):

- [1] YAO T D, THOMPSON L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 663-667.
- [2] 秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究: 现状、趋势及关键问题 [J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(4): 187-195.
- [3] 李娟茹. 全球变暖背景下青藏高原气温和降水的气候变化特征 [J]. *地球科学前沿*, 2019(11): 1042-1049.
- LI X R. Characteristics of temperature and precipitation change on the Tibet Plateau under the background of global warming [J]. *Advances in Geosciences*, 2019(11): 1042-1049.
- [4] 李悦绮, 钟若媚. 1979—2018年青藏高原气温与湿度特征分析 [J]. *气候变化研究快报*, 2020(4): 340-354.
- LI Y Q, ZHONG R M. Temperature and humidity characteristics of the Qinghai-Tibet Plateau from 1979 to 2018 [J]. *Climate Change Research Letters*, 2020(4): 340-354.
- [5] GUO W Q, LIU S Y, XU J L, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results [J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357-372.
- [6] 除多, 洛桑曲珍, 杨志刚, 等. 1981—2010年青藏高原降雪日数时空变化特征 [J]. *应用气象学报*, 2017, 28(3): 292-305.
- CHU D, LUOSANGQUZHEN, YANG Z G, et al. Spatiotemporal variations of snowfall days over the Tibetan Plateau from 1981 to 2010 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(3): 292-305.
- [7] 周幼吾, 郭东信. 我国多年冻土的主要特征 [J]. *冰川冻土*, 1982, 4(1): 1-19.
- ZHOU Y W, GUO D X. Principal characteristics of permafrost in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, 4(1): 1-19.
- [8] 赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1233-1246.
- ZHAO L, HU G J, ZOU D F, et al. Permafrost changes and its effects on hydrological processes on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1233-1246.
- [9] 姜响, 王文燕, 史常艳, 等. 生态功能改善目标下的青海省“三线一单”编制实践 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1293-1299.
- JIANG Y, WANG W Y, SHI C Y, et al. Compilation and practice of ‘three lines and one list’ in Qinghai Province under the objective of ecological function improvement [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1293-1299.
- [10] 曹晓云, 肖建设, 郝晓华, 等. 2001—2020年三江源地区积雪日数变化及地形分异 [J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5): 1370-1380.
- CAO X Y, XIAO J S, HAO X H, et al. Variation of snow cover days and topographic differentiation in Sanjiangyuan Area from 2001 to 2020 [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5): 1370-1380.
- [11] IPCC. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2019: 755-756.
- [12] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征 [J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(5): 374-381.
- DUAN A M, XIAO Z X, WU G X. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979-2014 [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(5): 374-381.
- [13] 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6(3): 181-186.
- LI L, CHEN X G, WANG Z Y, et al. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(3): 181-186.
- [14] ZHANG H B, IMMERZEEL W W, ZHANG F, et al. Snow cover

- persistence reverses the altitudinal patterns of warming above and below 5000 m on the Tibetan Plateau[J].*Science of the Total Environment*,2022,803:149889.
- [15] 李晓英,姚正毅,肖建华,等.1961—2010年青藏高原降水时空变化特征分析[J].*冰川冻土*,2016,38(5):1233-1240.
LI X Y,YAO Z Y,XIAO J H,et al.Analysis of the spatial-temporal variation characteristics of precipitation over the Tibetan Plateau from 1961 through 2010[J].*Journal of Glaciology and Geocryology*,2016,38(5):1233-1240.
- [16] 许建伟,高艳红,彭保发,等.1979—2016年青藏高原降水的变化特征及成因分析[J].*高原气象*,2020,39(2):234-244.
XU J W,GAO Y H,PENG B F,et al.Change characteristics of precipitation and its cause during 1979-2016 over the Qinghai-Tibetan Plateau[J].*Plateau Meteorology*,2020,39(2):234-244.
- [17] YOU Q L,FRAEDRICH K,MIN J Z,et al.Observed surface wind speed in the Tibetan Plateau since 1980 and its physical causes[J].*International Journal of Climatology*,2014,34(6):1873-1882.
- [18] 张岩,张建军,张艳得,等.三江源区径流长期变化趋势对降水响应的空间差异[J].*环境科学研究*,2017,30(1):40-50.
ZHANG Y,ZHANG J J,ZHANG Y D,et al.Spatial variation of long-term runoff trends and response to precipitation change in the Three-River Headwaters Region[J].*Research of Environmental Sciences*,2017,30(1):40-50.
- [19] 王宁练,姚檀栋,徐柏青,等.全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J].*中国科学院院刊*,2019,34(11):1220-1232.
WANG N L,YAO T D,XU B Q,et al.Spatiotemporal pattern,trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J].*Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,2019,34(11):1220-1232.
- [20] 赵瑞,叶庆华,宗继彪.青藏高原南部佩枯错流域冰川-湖泊变化及其对气候的响应[J].*干旱区资源与环境*,2016,30(2):147-152.
ZHAO R,YE Q H,ZONG J B.Glacier and water storage changes in Peiku Co basin on Tibetan Plateau and its responses to the climatic changes[J].*Journal of Arid Land Resources and Environment*,2016,30(2):147-152.
- [21] BOLCH T,KULKARNI A,KÄÄB A,et al.The state and fate of Himalayan glaciers[J].*Science*,2012,336(6079):310-314.
- [22] 秦大河,翟盘茂.中国气候与生态环境演变:2021(第一卷 科学基础)[M].北京:科学出版社,2021.
- [23] 李振林,秦翔,王晶,等.2004—2015年祁连山脉东部冷龙岭冰川遥感监测[J].*测绘科学*,2018,43(6):45-51.
LI Z L,QIN X,WANG J,et al.Glaciery distribution characteristics and change detection from 2004 to 2015 in the Lenglongling in the east of Qilian Mountains[J].*Science of Surveying and Mapping*,2018,43(6):45-51.
- [24] 胡凡盛,杨太保,冀琴,等.近25年布喀达坂峰冰川变化与气候的响应[J].*干旱区地理*,2018,41(1):66-73.
HU F S,YANG T B,JI Q,et al.Response of glacier in the Bukatage Mountains to climate change from 1990 to 2015[J].*Arid Land Geography*,2018,41(1):66-73.
- [25] GAO H F,ZOU X J,WU J F,et al.Post-20th century near-steady state of Batura Glacier:observational evidence of Karakoram Anomaly[J].*Scientific Reports*,2020,10:987.
- [26] GARDNER A S,MOHOLDT G,COGLEY J G,et al.A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise:2003 to 2009[J].*Science*,2013,340(6134):852-857.
- [27] IPCC.Climate change 2022:the physical science basis Press Cambridge University Education[M].Cambridge:Cambridge University Press,2021:56-57.
- [28] 张若楠,张人禾,左志燕.中国冬季多种积雪参数的时空特征及差异性[J].*气候与环境研究*,2014,19(5):572-586.
ZHANG R N,ZHANG R H,ZUO Z Y.Characteristics and differences of multi-snow data in winter over China[J].*Climatic and Environmental Research*,2014,19(5):572-586.
- [29] 车涛,郝晓华,戴礼云,等.青藏高原积雪变化及其影响[J].*中国科学院院刊*,2019,34(11):1247-1253.
CHE T,HAO X H,DAI L Y,et al.Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J].*Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,2019,34(11):1247-1253.
- [30] 傅敏宁.青藏高原气候变化响应对我国防灾减灾的挑战[J].*中国减灾*,2021(7):46-49.
- [31] 姜琪,罗斯琼,文小航,等.1961—2014年青藏高原积雪时空特征及其影响因子[J].*高原气象*,2020,39(1):24-36.
JIANG Q,LUO S Q,WEN X H,et al.Spatial-temporal characteristics of snow and influence factors in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1961 to 2014[J].*Plateau Meteorology*,2020,39(1):24-36.
- [32] 李锡福,唐红玉.青藏高原积雪日数的空间分布及变化分析[J].*西南大学学报(自然科学版)*,2016,38(5):153-160.
LI X F,TANG H Y.Analysis of spatial distribution and change of snow-covered days on the Qinghai-Xizang Plateau[J].*Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*,2016,38(5):153-160.
- [33] 陈德亮,徐柏青,姚檀栋,等.青藏高原环境变化科学评估:过去、现在与未来[J].*科学通报*,2015,60(32):3025-3035.
CHEN D L,XU B Q,YAO T D,et al.Assessment of past,present and future environmental changes on the Tibetan Plateau[J].*Chinese Science Bulletin*,2015,60(32):3025-3035.
- [34] 保云涛,游庆龙,谢欣汝.青藏高原积雪时空变化特征及年际异常成因[J].*高原气象*,2018,37(4):899-910.
BAO Y T,YOU Q L,XIE X R.Spatial-temporal variability of the snow depth over the Qinghai-Tibetan Plateau and the cause of its interannual variation[J].*Plateau Meteorology*,2018,37(4):899-910.
- [35] 除多,洛桑曲珍,林志强,等.近30年青藏高原原雪深时空变化特征分析[J].*气象*,2018,44(2):233-243.
CHU D,LUOSANGQUZHEN,LIN Z Q,et al.Spatio-temporal variation of snow depth on Tibetan Plateau over the last 30 years[J].*Meteorological Monthly*,2018,44(2):233-243.
- [36] 程国栋,赵林,李韧,等.青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J].*科学通报*,2019,64(27):2783-2795.
CHENG G D,ZHAO L,LI R,et al.Characteristic,changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J].*Chinese Science Bulletin*,2019,64(27):2783-2795.
- [37] 王国尚,金会军,林清,等.青藏公路沿线多年冻土变化及环境意义[J].*冰川冻土*,1998,20(4):444-449.
WANG G S,JIN H J,LIN Q,et al.Changes of natural and engineering environments of permafrost regions along the Qinghai-Tibet Highway[J].*Journal of Glaciology and Geocryology*,1998,20(4):444-449.
- [38] 中国气象局气候变化中心.中国气候变化蓝皮书(2019)[M].北

- 京:科学出版社,2019.
- [39] 李韧,赵林,丁永建,等. 青藏公路沿线多年冻土区活动层动态变化及区域差异特征 [J]. 科学通报,2012,57(30):2864-2871.
- [40] WU Q B,ZHANG T J,LIU Y Z. Permafrost temperatures and thickness on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Global and Planetary Change*,2010,72(1/2):32-38.
- [41] FRAUENFELD O W,ZHANG T J. An observational 71-year history of seasonally frozen ground changes in the Eurasian high latitudes [J]. *Environmental Research Letters*,2011,6(4):044024.
- [42] 高荣,董文杰,韦志刚. 青藏高原季节性冻土的时空分布特征 [J]. 冰川冻土,2008,30(5):740-744.
- GAO R,DONG W J,WEI Z G. The features of temporal and spatial distributions of seasonal frozen soil in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2008,30(5):740-744.
- [43] 高思如,曾文钊,吴青柏,等. 1990—2014年西藏季节冻土最大冻结深度的时空变化 [J]. 冰川冻土,2018,40(2):223-230.
- GAO S R,ZENG W Z,WU Q B, et al. Temporal and spatial variations of the maximum frozen depth of seasonally frozen soil in Tibet from 1990 to 2014 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2018,40(2):223-230.
- [44] 蒋元春,李栋梁,郑然. 1971—2016年青藏高原原积雪冻土变化特征及其与植被的关系 [J]. 大气科学学报,2020,43(3):481-494.
- JIANG Y C,LI D L,ZHENG R. Variation characteristics of snow cover and frozen soil and their relationships with vegetation in the Tibetan Plateau from 1971 to 2016 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,2020,43(3):481-494.
- [45] LUO S Q,WANG J Y,POMEROY J W, et al. Freeze-thaw changes of seasonally frozen ground on the Tibetan Plateau from 1960 to 2014 [J]. *Journal of Climate*,2020,33(21):9427-9446.
- [46] QIN Y,LEI H M,YANG D W, et al. Long-term change in the depth of seasonally frozen ground and its ecohydrological impacts in the Qilian Mountains,northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*,2016,542:204-221.
- [47] 颜玉倩,祁栋林,沈晓燕,等. 三江源地区季节冻土时空格局及影响因素 [J]. 生态学报,2022,42(14):5603-5615.
- YAN Y Q,QI D L,SHEN X Y, et al. Spatio-temporal pattern and influencing factors of seasonal frozen soil in the Three Rivers Source Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2022,42(14):5603-5615.
- [48] GUO D L,WANG H J,LI D A. A projection of permafrost degradation on the Tibetan Plateau during the 21st century [J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*,2012,117(D5):e2011jd016545.
- [49] WANG M,XU B,CAO J, et al. Carbonaceous aerosols recorded in a southeastern Tibetan glacier:analysis of temporal variations and model estimates of sources and radiative forcing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*,2015,15(3):1191-1204.
- [50] SHIKLOMANOV N I. Non-climatic factors and long-term, continental-scale changes in seasonally frozen ground [J]. *Environmental Research Letters*,2012,7(1):011003.
- [51] 马占云,任佳雪,陈海涛,等. IPCC 第一工作组评估报告分析及建议 [J]. 环境科学研究,2022,35(11):2550-2558.
- MA Z Y,REN J X,CHEN H T, et al. Analysis and recommendations of IPCC Working Group I Assessment Report [J]. *Research of Environmental Sciences*,2022,35(11):2550-2558.
- [52] YANG K,WU H,QIN J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle:a review [J]. *Global and Planetary Change*,2014,112:79-91.
- [53] 陈虹举,杨建平,谭春萍. 中国冰川变化对气候变化的响应程度研究 [J]. 冰川冻土,2017,39(1):16-23.
- CHEN H J,YANG J P,TAN C P. Responsivity of glacier to climate change in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2017,39(1):16-23.
- [54] CUO L,ZHANG Y X,WANG Q C, et al. Climate change on the northern Tibetan Plateau during 1957-2009:spatial patterns and possible mechanisms [J]. *Journal of Climate*,2013,26(1):85-109.
- [55] SU B,XIAO C D,CHEN D L, et al. Glacier change in China over past decades:spatiotemporal patterns and influencing factors [J]. *Earth-Science Reviews*,2022,226:103926.
- [56] 杨志刚,达娃,除多. 近 15a 青藏高原积雪覆盖时空变化分析 [J]. 遥感技术与应用,2017,32(1):27-36.
- YANG Z G,DAWA,CHU D. Spatiotemporal variations of snow cover on the Tibetan Plateau over the last 15 years [J]. *Remote Sensing Technology and Application*,2017,32(1):27-36.
- [57] 李栋梁,王春学. 积雪分布及其对中国气候影响的研究进展 [J]. 大气科学学报,2011,34(5):627-636.
- LI D L,WANG C X. Research progress of snow cover and its influence on China climate [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,2011,34(5):627-636.
- [58] 张东,余志豪. 青藏高原原冬季积雪异常与我国夏季低温的关系 [J]. 气象科学,1999,19(1):1-8.
- ZHANG D,YU Z H. The relationship between snow cover over Qinghai-Xizang Plateau in winter and spring and low temperature damage in summer [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*,1999,19(1):1-8.
- [59] 苏永玲,张旭煜,袁媛,等. 2006年西南地区异常高温及其成因分析 [J]. 成都信息工程学院学报,2007,22(增刊1):16-22.
- [60] 沈懿澄,吴涛,游庆龙,等. 青藏高原中东部积雪深度时空变化特征及其成因分析 [J]. 冰川冻土,2019,41(5):1150-1161.
- SHEN L C,WU T,YOU Q L, et al. Analysis of the characteristics of spatial and temporal variations of snow depth and their causes over the central and eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2019,41(5):1150-1161.
- [61] XU W F,MA L J,MA M N, et al. Spatial-temporal variability of snow cover and depth in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Climate*,2017,30(4):1521-1533.
- [62] PENG X Q,ZHANG T J,FRAUENFELD O W, et al. Response of seasonal soil freeze depth to climate change across China [J]. *The Cryosphere*,2017,11(3):1059-1073.
- [63] ZHAO L,PING C L,YANG D Q, et al. Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau,China [J]. *Global and Planetary Change*,2004,43(1/2):19-31.
- [64] LIANG W,YANG Y T,FAN D M, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2015,204:22-36.

(责任编辑:周巧富)